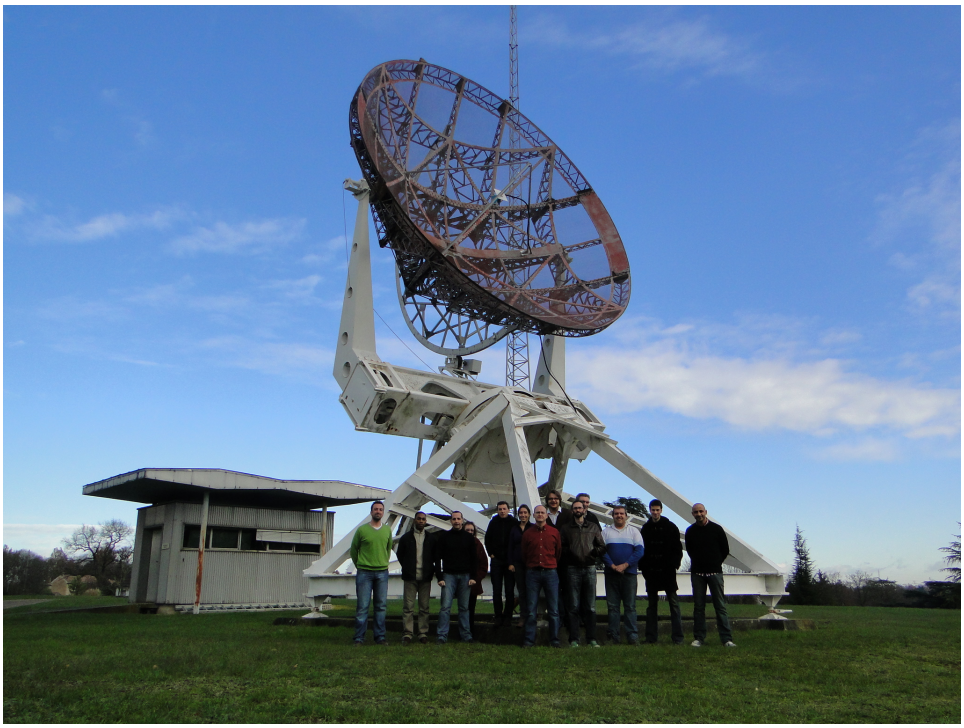
Radiotélescope Würzburg
Présentation et manuel d'utilisation

Fabrice Herpin (LAB-OASU)
herpin@obs.u-bordeaux1.fr
fabriceherpin@yahoo.fr
Version 1.3



Longitude 0°31'32'' O, Latitude 44°50'6'' N, Altitude 73m

Résumé

Nous avons débuté à l'automne 2007 sur le site du LAB/OASU à Floirac, près de Bordeaux, la rénovation d'un radiotélescope Würzburg afin de le transformer en un outil pédagogique et de vulgarisation performant. Dès maintenant, l'étude du HI galactique et de l'émission OH est possible. L'instrument est mis à disposition à la fois des enseignants (tous niveaux d'enseignement), des étudiants et des amateurs via une interface web ou en local. Nous proposons d'utiliser ce radiotélescope via internet, et/ou via des mini-stages sur site encadrés par le personnel de recherche. A terme, cet outil sera incorporé au projet « Hands-On Universe ». Il est important de noter que le radiotélescope est ouverte à tous !

MESSAGE IMPORTANT

Pendant vos observations, ne pas essayer de «naviguer», en cliquant sur les boutons de votre navigateur (touche retour, rafraichissement…). Ce problème sera résolu à l'avenir. De plus, en mode averti, ne mettez pas d'espace dans le nom de votre source. Ces problèmes sont en cours de résolution.

Table des matières

I.Introduction à la radioastronomie 3

II.Présentation du radiotélescope....5

III.Que peut-on observer avec ce radiotélescope ?....6

IV.Contraintes du radiotélescope 9

1. Champ de vision de l'instrument 9
2. Mode d'observation....9
3. Temps d'intégration....9
4. Parasites et fréquence off....10
5. Sources de référence....10

V.Comment utiliser le radiotélescope ? 11

1. Se connecter 11
2. Réserver une date d'observation 12
3. Observer en mode normal (i.e. novice) 13
4. Observer en mode averti....16
5. Récupérer vos observations....17

VI.Cartographier la Galaxie 18

1. Les coordonnées galactiques 18
2. L'hydrogène de la Galaxie....18
3. Géométrie de la Galaxie 19
4. La courbe de rotation....20
5. La distance du nuage au centre galactique R 20
6. La position du nuage en coordonnées polaires (r,l)....21

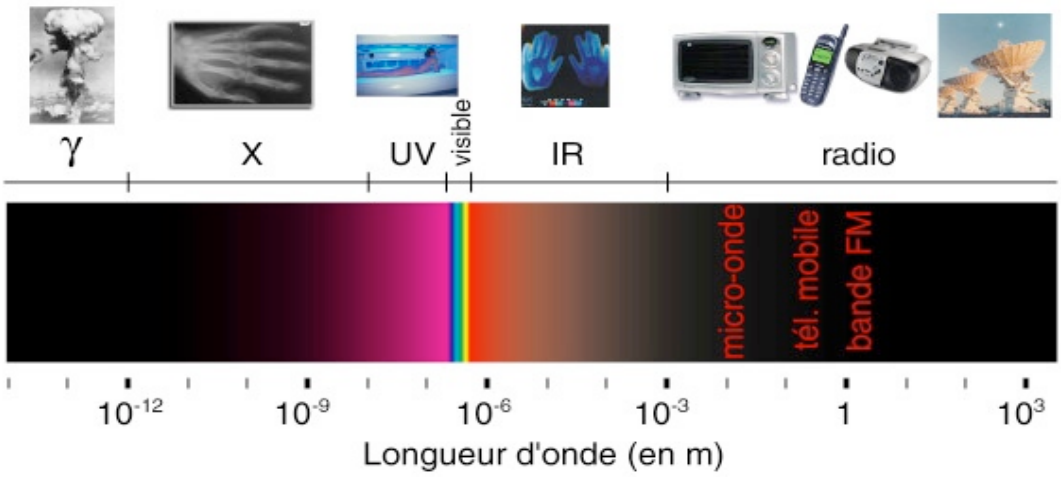
VII.Analyser les observations 22

1. A partir de l'image....22
2. A partir du fichier Texte (X,Y) 22
3. A partir des fichiers CLASS....23

VIII.Equipe Würzburg....29

I. *INTRODUCTION À LA RADIOASTRONOMIE*

Moins connue du grand public que l'astronomie optique, la radioastronomie est à l'origine de découvertes majeures comme le rayonnement de fond cosmologique. L'avantage de l'utilisation de radiotélescopes réside dans la possibilité d'observation en plein jour, en pleine ville, de notre Galaxie.



La radioastronomie est la science qui étudie le rayonnement électromagnétique émis par les sources astronomiques à des longueurs d'onde plus grandes que celles émises dans l'optique et l'infrarouge, entre quelques MHz et 2 THz (ou en longueur d'onde λ de quelques dizaines de mètre à quelques dixièmes de millimètre). Les domaines millimétriques ($\lambda>1$ mm) et submillimétriques ($\lambda<1$ mm) permettent l'exploration de régions inaccessibles au visible et à l'UV : les régions jeunes de formation stellaire. Ces régions sont relativement froides et émettent préférentiellement dans le domaine radio.

Les signaux captés par les radiotélescopes sont des ondes électromagnétiques émises par les molécules, atomes ou ions dans l'espace, autour des étoiles, dans les nuages moléculaires, etc.. Ces espèces ont été excitées par une source de chaleur (par exemple : étoile à proximité ou chocs de gaz) et ont émis des photons en se désexcitant vers leur état normal. L'émission de chaque molécule est très faible, mais vu l'immensité des espaces interstellaires, l'émission totale est parfaitement détectable. L'émission du signal ne se fait qu'à des fréquences bien déterminées et connus. De la même manière qu'en tournant le bouton d'un récepteur radio l'on s'accorde sur la fréquence d'une station, le radiotélescope s'accorde sur les fréquences émises par les molécules, ce qui facilite leur identification.

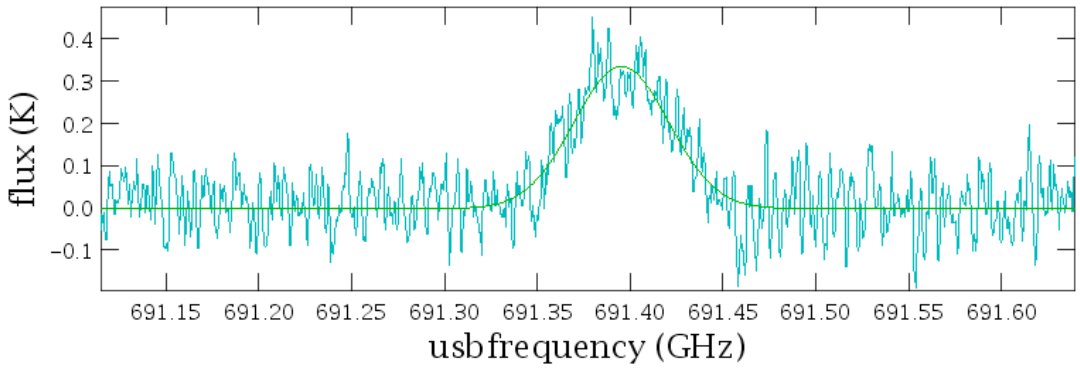


Figure 1 : exemple de signal radio (molécule CO) détecté (avec une autre antenne). Le signal est observé autour d'une fréquence donnée et on mesure sa force par une quantité appelée flux ou intensité (en Kelvins).

II. *PRÉSENTATION DU RADIOTÉLESCOPE*

Le radiotélescope Würzburg est un ancien radar de l'armée allemande implanté sur le site de l'observatoire en 1962. Il a servi à observer de façon continue le Soleil de 1966 à 1987, sa rénovation a débuté en 2007.

Figure 2 : Radiotélescope Würzburg (gauche) et cornet (droite)

Utilisé auparavant pour l'observation des sursauts solaire, le récepteur était réglé pour 930 MHz. Après rénovation, les bandes de fréquences d'observation sont entre **1.35 GHz et 2.7 GHz**

Le Würzburg se compose :
- d'une antenne collectrice de forme parabolique de 7,5 m de diamètre,
- d'un cornet (Figure 2) qui reçoit le signal collecté par l'antenne (focalisé sur celui-ci) et le transmet à l'électronique,
- de systèmes électroniques et d'un PC pour le traitement du signal reçu et le pilotage de l'antenne.

En radioastronomie, le pouvoir de résolution est caractérisé par la largeur du lobe principal à mi-hauteur, noté $\theta = HPBW$. Dans l'approximation d'un lobe gaussien, ce pouvoir de résolution est donné par :

$$\theta = 1{,}22\ \lambda/D$$

Où :
- θ est exprimé en radian,
- λ est la longueur d'onde d'observation,
- D est le diamètre de l'antenne.

Déterminé expérimentalement, le **lobe de l'antenne est $\theta = 2.8°$**, ce qui correspond à un diamètre d'antenne de 4.9m.

III. *QUE PEUT-ON OBSERVER AVEC CE RADIOTÉLESCOPE ?*

La gamme de fréquences offerte permet notamment d'observer :

- l'hydrogène H_I galactique en émission/absorption à 21 cm de longueur d'onde, soit une fréquence de 1420,4 MHz,
- les émissions maser OH à 1.6-1.7GHz (voir ci-dessous)

Notation	Fréquence d'émission (MHz)
OH(1-2)	1612,2
OH(1-1)	1665,4
OH(2-2)	1667,4
OH(2-1)	1720,5

Pourquoi ces transitions de HI et de OH ?

La plupart du gaz dans notre Galaxie est sous forme d'hydrogène atomique HI, qui émet un rayonnement radio à une longueur d'onde de 21 cm (c'est-à-dire une fréquence de 1420 MHz). La raie à 21 cm avait été prédite théoriquement en 1945 par van de Hulst et a été observée pour la première fois en 1951.

La plupart des étoiles et du gaz de notre Galaxie se situe dans un disque fin. Le soleil est situé à une distance d'environ 8.5 kpc (25 000 années-lumière) du centre galactique. Du fait de notre position dans la Galaxie, il est assez difficile d'étudier la structure tridimensionnelle de celle-ci. Les observations radioastronomiques de l'atome d'hydrogène ont aidé à révéler les propriétés de la Galaxie, principalement parce que ce type de rayonnement n'est pas "éteint" par la poussière et que le gaz s'étend, au contraire des étoiles, au delà du disque galactique.

Notre Galaxie

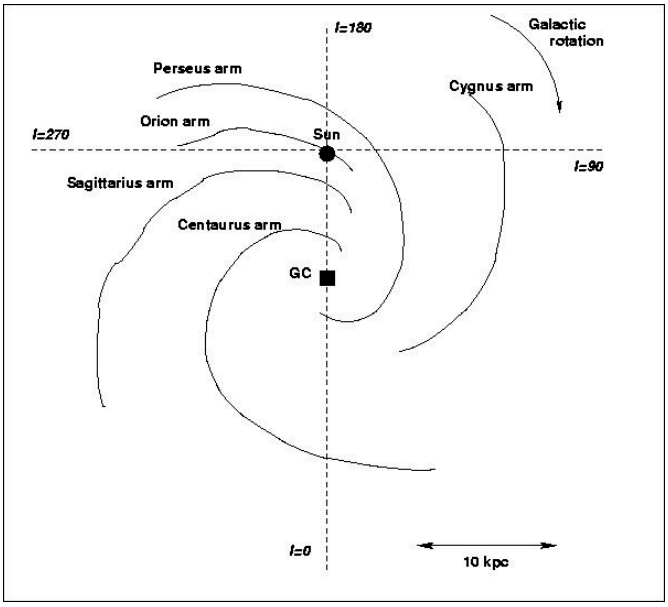
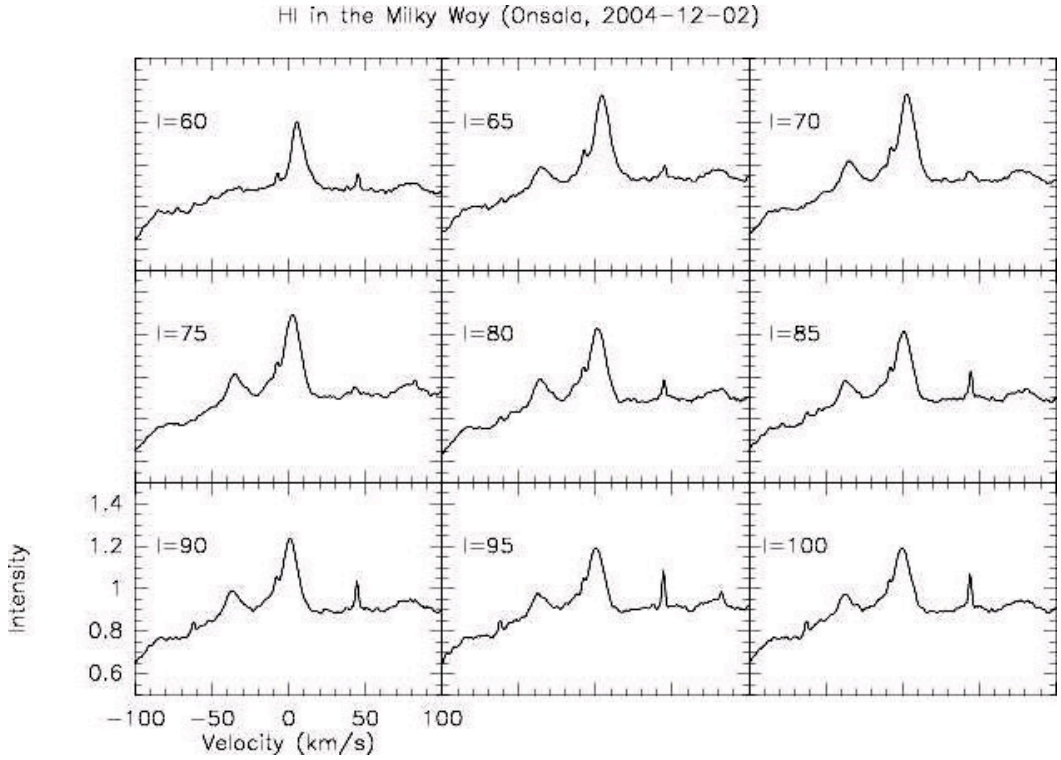


Figure 3 : Vue de notre galaxie (image : Observatoire d'Onsala, Suède). «GC» représente le centre galactique. La position de la Terre est confondue avec celle du Soleil («Sun»)

Dans le système de coordonnées galactiques (voir Section VI), la longitude *l* est comptée de zéro (axe soleil vers le centre galactique) et augmente dans le sens contre-horaire. La latitude *b* donne l'angle par rapport au plan de la Galaxie (*b*=0 étant le plan galactique donc). D'une position donnée sur la Terre, seulement une partie de la Voie Lactée peut être observée.

L'émission HI

La figure ci-dessous montre une série de spectres HI obtenus à différentes longitudes de notre Galaxie par le télescope SALSA de Onsala (sensiblement équivalent à notre isntrument).



Si le gaz a une vitesse *v* relative à l'observateur, alors la longueur d'onde λ du signal observé change d'un facteur $\Delta\lambda = v/c\ \lambda$ où *c* est la vitesse de la lumière. Ce phénomène est appelé "effet Doppler" et Δλ est le "décalage Doppler".

Ainsi, à partir de la fréquence mesurée pour chaque pic du signal HI, on peut remonter aux vitesses du gaz : pour chaque spectre, la position du pic de la raie observée donne une fréquence, qui, par effet Doppler, peut être convertie en vitesse sur la ligne de visée.

En supposant que la vitesse totale est constante avec le rayon (= rotation différentielle, caractéristique des galaxies spirales), on peut calculer la distance du nuage de gaz. Ceci est détaillé dans la Section VI.

L'émission OH

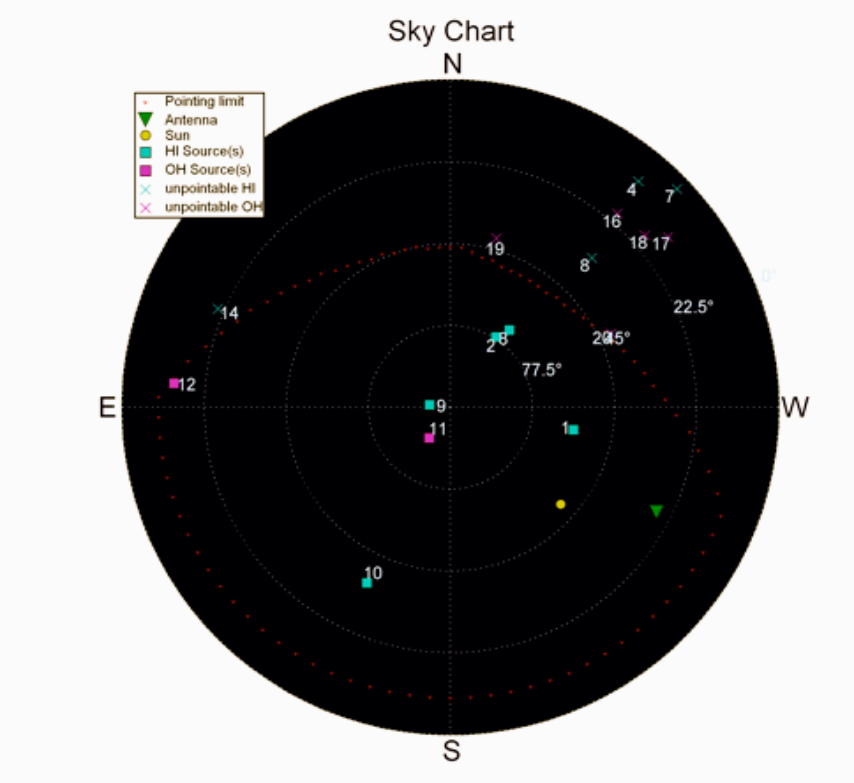
OH fut la première molécule astronomique détectée (1963) dans la partie radio du spectre électromagnétique. Les raies spectrales de OH sont aux longueurs d'onde 2.2, 3.7, 5.0, 6.3 et 18 cm. Cette molécule est observée dans l'atmosphère terrestre, les atmosphères planétaires, dans les comètes, dans les nuages moléculaires, les galaxies, mais surtout dans les étoiles évoluées (étoiles plus vieilles que notre Soleil et de masse équivalente) sous forme de rayonnements maser. Le rayonnement maser à 18 cm du radical OH émis par les étoiles évoluées est en fait constitué de 3 raies : les raies dites principales à 1665 et 1667 MHz et la

raie satellite à 1612 MHz.
Selon l'intensité des raies maser OH à 1.7 GHz, on peut classer les étoiles évoluées en différents groupes. (Type I ou II). On peut aussi étudier la périodicité de ce rayonnement par rapport à la variation de luminosité de l'étoile (la courbe de lumière de la plupart de ces étoiles est connue et les données disponibles). Le spectre « classique » des émissions maser OH est caractérisé par un profil double-pics. De la séparation en vitesse des 2 pics, on peut déduire la vitesse d'expansion de l'enveloppe OH, tandis que la vitesse médiane donne la vitesse de l'étoile centrale.

IV. *CONTRAINTES DU RADIOTÉLESCOPE*

1. Champ de vision de l'instrument

Du fait de sa monture, l'antenne ne peut observer qu'une certaine partie du ciel. Chaque fois que vous sélectionné une source à observer une carte du ciel s'affiche sur l'écran avec la partie du ciel observable. Sur l'image ci-dessous, la portion du ciel accessible est délimitée par le pointillé rouge (en dessous).



2. Mode d'observation

Il existe plusieurs modes d'observation avec un radiotélescope. Celui utilisé avec le Würzburg est le mode ***frequency switch***.

Ce mode consiste à observer (intégrer) une source pendant un certain temps sur une bande de fréquence puis observer la même source (même position spatiale) mais dans une bande de fréquence où la source n'émet pas (*fréquence off*). Afin d'obtenir le spectre de la source sans les défauts inhérents à l'antenne et l'environnement, il suffit alors de faire la différence entre les 2 observations.

Le Würzburg permet d'obtenir des spectres dont la **largeur de bande est de 10 MHz** avec une **résolution de 5 kHz**.

3. Temps d'intégration

Plus nous intégrons longtemps sur une source, meilleur est le rapport signal sur bruit et plus il est facile de détecter des sources faibles. L'électronique du Würzburg ne permet, pour l'instant, que d'intégrer au maximum une seconde afin de garantir la stabilité du système. Les

observations seront donc constituées de plusieurs spectres de 1*s* qui seront additionnés par la suite (avec un logiciel adhoc comme *Class*[1]*)*.
Par ailleurs, pour l'instant, le temps total d'intégration par observation ne peut dépasser 4 min. Si vous voulez observer plus, vous devez resélectionner à nouveau votre source et réobserver. Cette limitation est due à l'envoi des données par mail. Dans un futur proche, il sera possible de récupérer les données d'une autre manière.

4. Parasites et fréquence off

Les agglomérations représentent une source importante de nuisances pour l'observation astronomique. Ainsi, dans le domaine visible, l'observation est rendue difficile à cause de la pollution lumineuse. La présence de parasites dans le domaine radio est moins connue (non visible et ayant moins de conséquences sur l'environnement) mais tout aussi dérangeante pour l'astrophysique. Bien que certaines bandes de fréquence soient légalement réservées à la radioastronomie, il est courant de trouver des parasites dans ces bandes à cause du non-respect de la loi ou d'un réglage inadapté des installations (présence d'harmoniques d'un signal dans les bandes réservées).
Les tests effectués ont montré que pour le HI la zone autour de El=20° et Az=240° est très parasitée. Plus généralement, toute observation en dessous de El=20° est à proscrire. En ce qui concerne OH, la transition OH(2-1) n'est pas observable.
De plus, ces tests ont permis de déterminer la fréquence off utilisée dans le mode d'observation *frequency switch*. En effet, comme le spectre off est soustrait au spectre brut, il ne faut pas qu'il y ait des raies d'émission (parasite ou source astronomique) sous peine d'obtenir un spectre final aberrant (présence de raie d'absorption dû à la soustraction des raies d'émission du spectre off).

5. Sources de référence

Afin de valider la calibration des observations, nous avons observé des sources de référence dont le spectre est connu et présent dans la base de données Leiden/Argentine/Bonn Galactic HI Survey (http://www.astro.uni-bonn.de/~webaiub/english/tools_labsurvey.php).

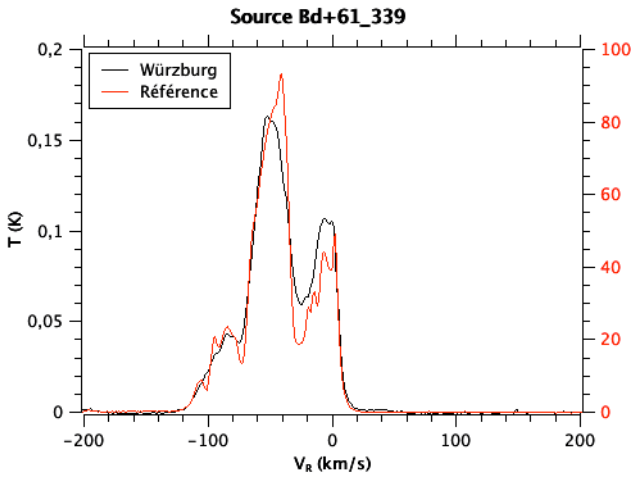


Figure 4 : Comparaison spectre Würzburg (en noir) - spectre de référence (rouge) pour une observation d'une région de notre Galaxie. Les détails du spectre sont les mêmes, les échelles de vitesse et intensité aussi.

---

[1] CLASS est un logiciel développé par l'IRAM (http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS)

V. *COMMENT UTILISER LE RADIOTÉLESCOPE ?*

1. Se connecter

Il suffit de se connecter sur la **page web du Würzburg** avec n'importe quel navigateur internet :

http://serveurwurzburg.obs.u-bordeaux1.fr

Vous avez alors sur votre navigateur la page suivante qui s'affiche :

Si vous avez déjà un compte utilisateur, vous entrez votre nom de login et votre mot de passe afin de vous connecter. Vous passez directement à l'étape 2).
Pour un nouvel utilisateur, il faut d'abord cliquer sur le message en violet à gauche de l'écran. Ensuite, un *formulaire d'inscription* apparait comme suit :

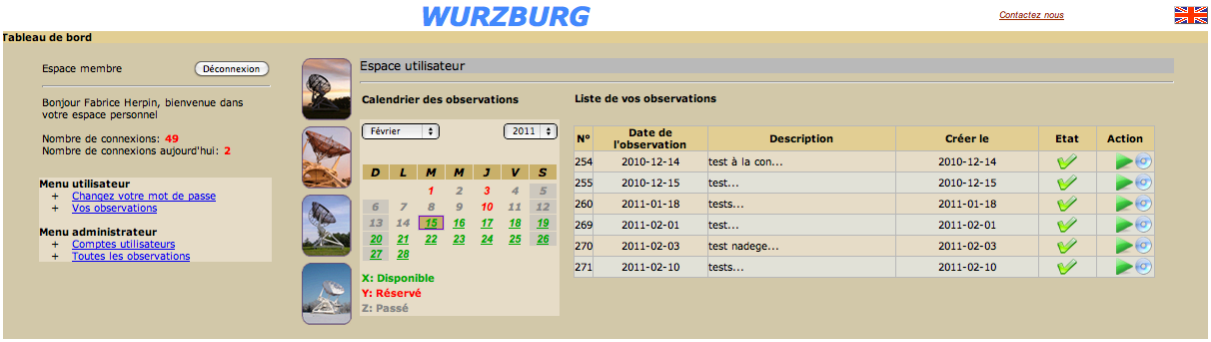
WURZBURG
Contactez nous
Calendrier des observations
Février
2011
D L M M J V S
X: Disponible
Y: Réservé
Z: Passé
Formulaire d'inscription(* Information obligatoire)
Votre nom *
Votre prénom *
Votre téléphone
Votre mèl *
Votre fonction *
Votre société *
Ecrivez le résultat *
5 + 1
Créer
Annuler
Effacer
Information
Pour créer un compte utilisateur, vous devez avoir obligatoirement une messagerie électronique. Veuillez remplir le formulaire ci-contre et suivre les instructions. Après l'avoir validé, vous devez envoyer le mail préparé par notre serveur pour que l'administrateur soit informer.

Il vous suffit de remplir tous les champs, puis de cliquer sur «créer». Vous recevrez alors automatiquement dans les minutes qui suivent un mail contenant vos identifiants. Il n'y a en

effet aucune restriction, aucun filtre à l'utilisation du radiotélescope. Nous demandons juste vos coordonnées en cas de problème.

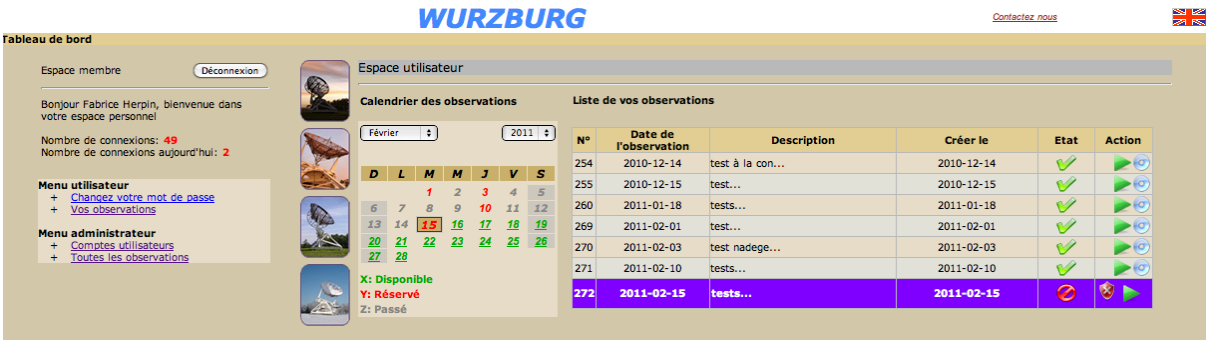
2. Réserver une date d'observation

Dès que vous êtes connecté, vous avez accès à la **réservation d'observation** et à la **liste de vos réservations et observations passées** :


WURZBURG
Contactez nous
Tableau de bord
Espace membre
Déconnexion
Bonjour Fabrice Herpin, bienvenue dans votre espace personnel
Nombre de connexions: 49
Nombre de connexions aujourd'hui: 2
Menu utilisateur
Changez votre mot de passe
Vos observations
Menu administrateur
Comptes utilisateurs
Toutes les observations
Espace utilisateur
Calendrier des observations
Liste de vos observations
Février
2011
X: Disponible
Y: Réservé
Z: Passé
N° | Date de l'observation | Description | Créer le | Etat | Action
254 | 2010-12-14 | test à la con... | 2010-12-14
255 | 2010-12-15 | test... | 2010-12-15
260 | 2011-01-18 | tests... | 2011-01-18
269 | 2011-02-01 | test... | 2011-02-01
270 | 2011-02-03 | test nadege... | 2011-02-03
271 | 2011-02-10 | tests... | 2011-02-10

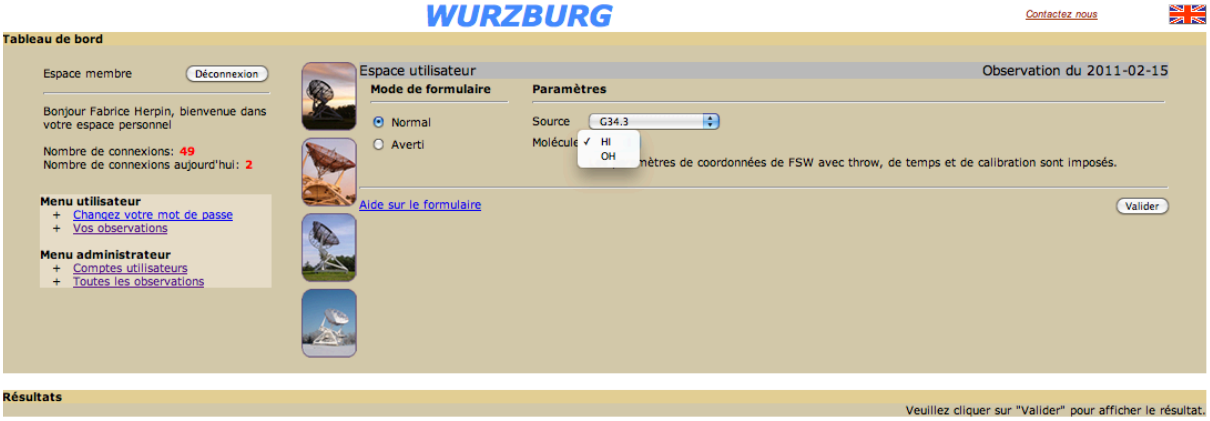
Pour réserver une date, il vous suffit de cliquer sur une date (disponible bien sûr, donc en vert) du calendrier. A noter que pour l'instant, vous ne pouvez réserver qu'un jour entier d'observation. Il vous est alors demandé de remplir un nouveau champ en décrivant (en quelques mots) le but de votre observation (exemple : «*1er essai d'observation radio pour un novice !* »).

Maintenant votre réservation apparait sur le calendrier en rouge, ainsi que dans la liste des observations avec le signe ⌀ pour son statut («*état*»).
Pour commencer vos observations il suffit à présent de cliquer sur la flèche verte à côté.

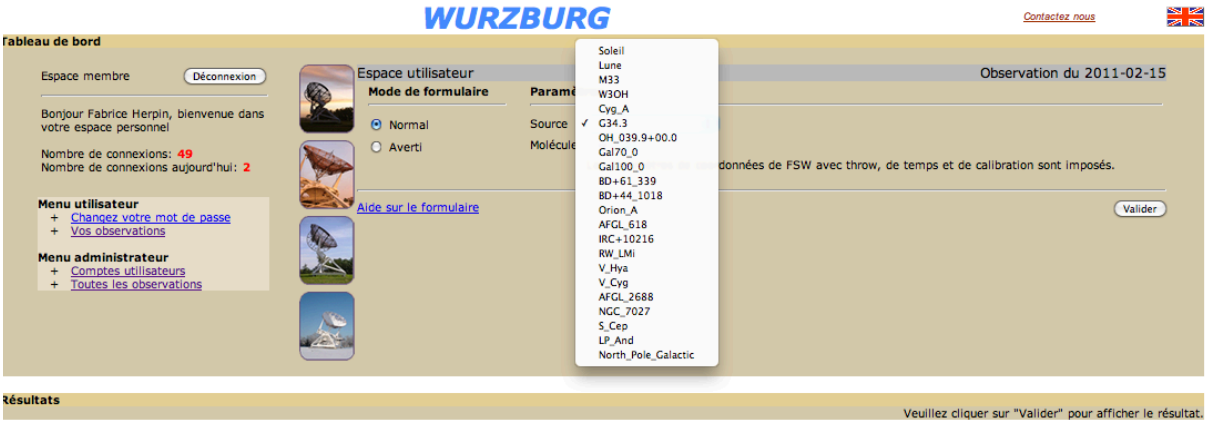

WURZBURG
Contactez nous
Tableau de bord
Espace membre
Déconnexion
Bonjour Fabrice Herpin, bienvenue dans votre espace personnel
Nombre de connexions: 49
Nombre de connexions aujourd'hui: 2
Menu utilisateur
Changez votre mot de passe
Vos observations
Menu administrateur
Comptes utilisateurs
Toutes les observations
Espace utilisateur
Calendrier des observations
Liste de vos observations
Février
2011
X: Disponible
Y: Réservé
Z: Passé
N° | Date de l'observation | Description | Créer le | Etat | Action
254 | 2010-12-14 | test à la con... | 2010-12-14
255 | 2010-12-15 | test... | 2010-12-15
260 | 2011-01-18 | tests... | 2011-01-18
269 | 2011-02-01 | test... | 2011-02-01
270 | 2011-02-03 | test nadege... | 2011-02-03
271 | 2011-02-10 | tests... | 2011-02-10
272 | 2011-02-15 | tests... | 2011-02-15

3. *Observer en mode normal (i.e. novice)*

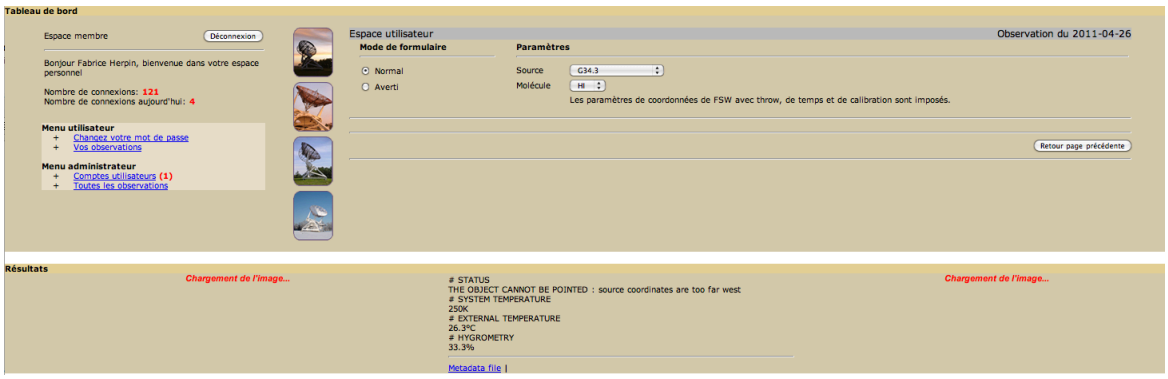
Dans ce mode d'observation destiné aux personnes inexpérimentées, vous ne pouvez **choisir** que l'espèce que vous voulez observer, **HI ou OH**, **et la source** parmi une liste d'objets pré-sélectionnés. *Tous les autres réglages du radiotélescope (par exemple le temps d'intégration) sont imposés.*



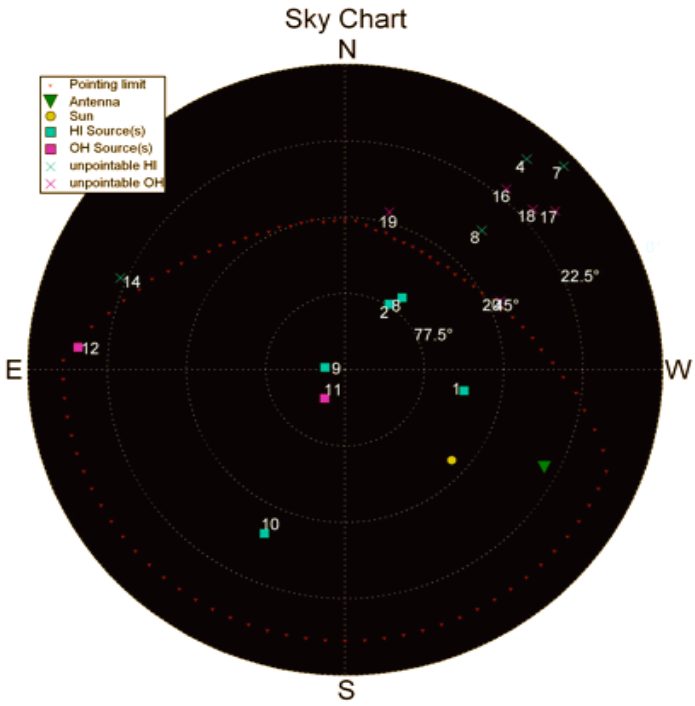
Je sélectionne par exemple l'objet G34.3 et je valide pour démarrer l'observation.



Si la source n'est pas visible, un message apparait en bas de l'écran: «*The object cannot be pointed*».



Dans ce cas, vous devez donc sélectionner une autre source. Pour cela, vous pouvez vous aider de l'image du ciel en temps réel qui apparait en bas de la page en sélectionnant une source représentée soit par un carré bleu (source HI), soit par un carré rose (source OH) :

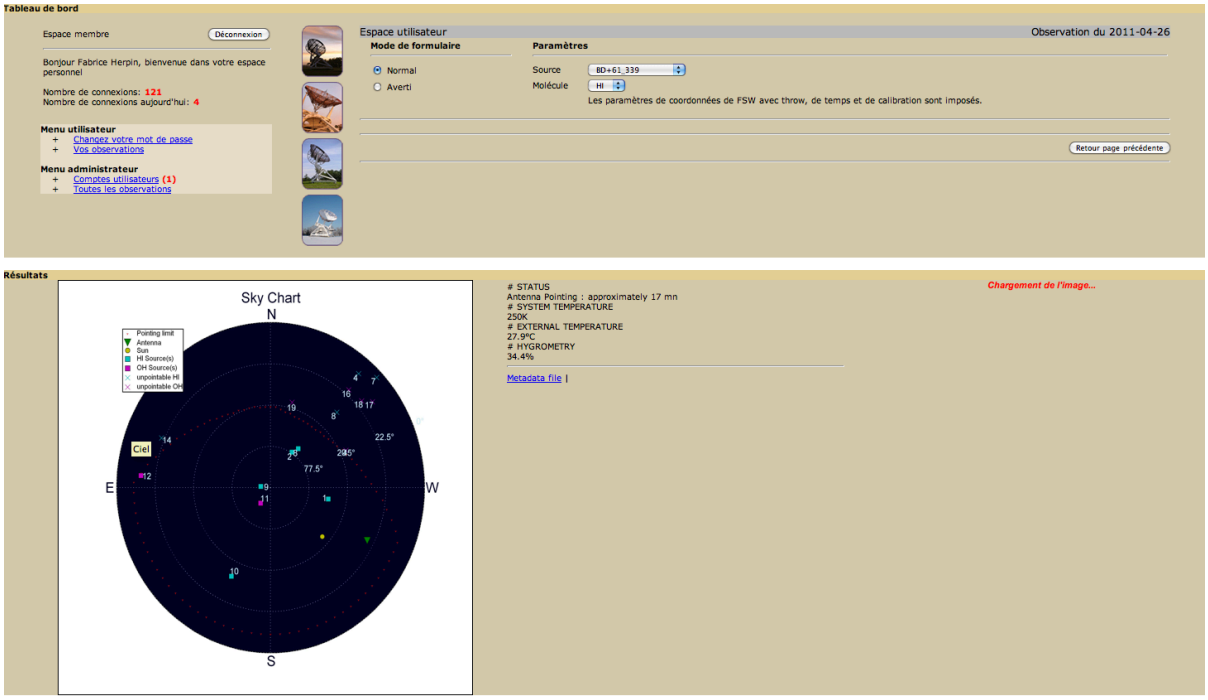


Le triangle vert vous donne la position pointée actuellement par le radiotélescope. Les numéros correspondent aux objets suivants :

1- M33 (HI)
2- W3OH (HI)
3- Cyg A (HI)
4- G34.3 (HI)
5- OH 039.9+00.0 (HI)
6- GAL70.0+0.0 (HI)
7- GAL100.0+0.0 (HI)
8- BD+61.339 (HI)
9- BD+44.1018 (HI)
10- Orion A (HI)
11- AFGL618 (OH)
12- IRC+10216 (OH)
13- RW LMi (OH)
14- V Hya (OH)
15- V Cyg (OH)
16- AFGL2588 (OH)
17- NGC7027 (OH)
18- S Cep (OH)
19- LP And (OH)
20- Pôle Nord Galactique

Vous pouvez aussi vous servir de logiciels d'éphémérides (pour prédire la position des astres) installés sur votre ordinateur, par exemple *XEphem* pour Mac et Unix (http://www.clearskyinstitute.com/xephem/) ou *Carte du ciel* pour toute plateforme (http://www.ap-i.net/skychart/fr/start).

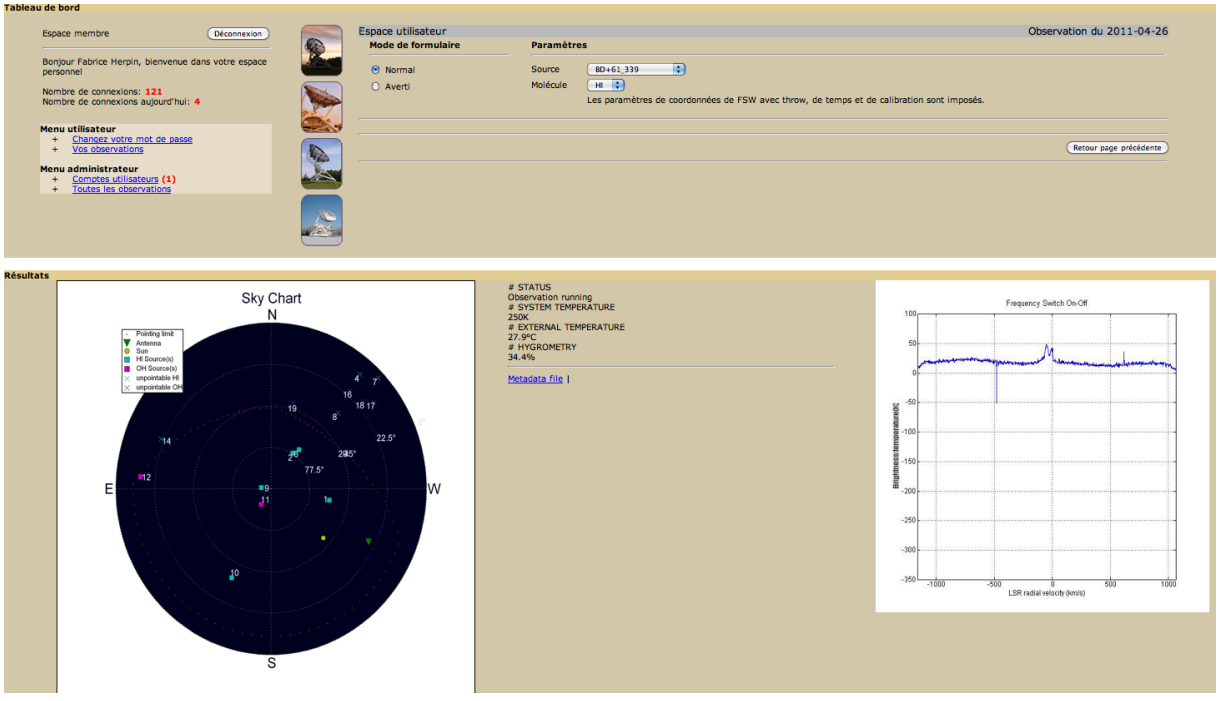
Après avoir validé votre choix, le radiotélescope se déplace vers la source («*pointage*»).



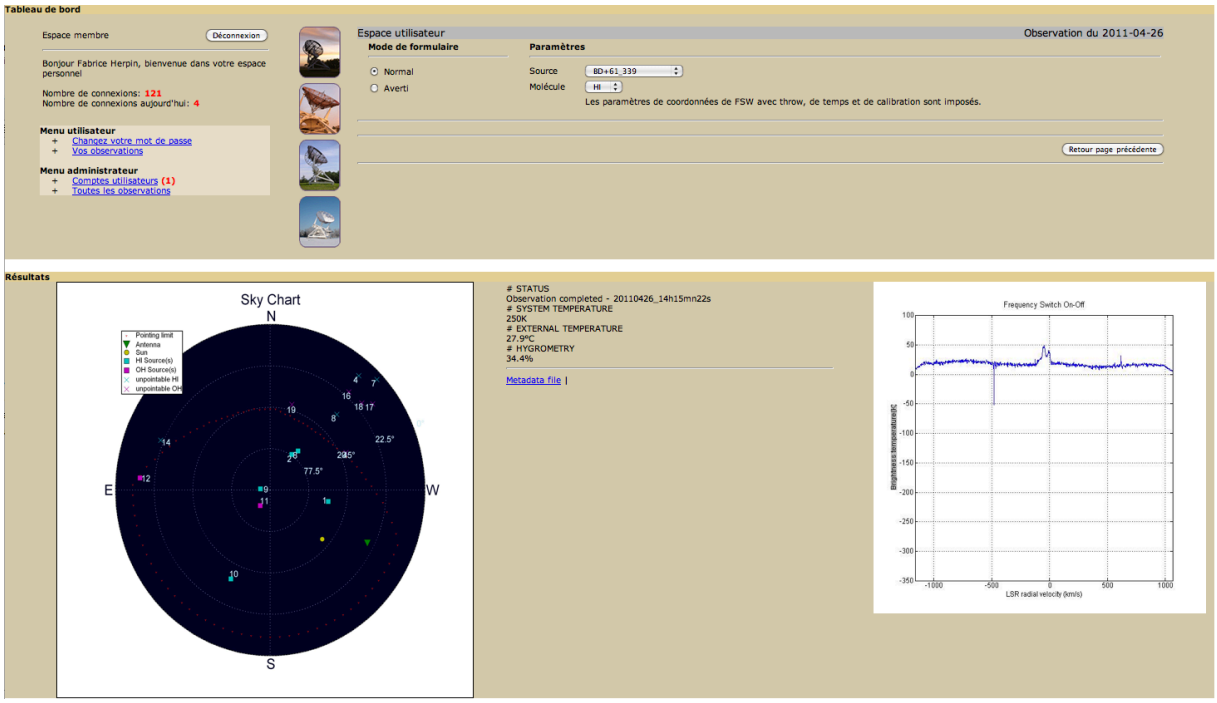
Selon l'écart entre la position actuelle de l'instrument et la position de cet objet, le temps de pointage peut-être plus ou moins long. Sur l'exemple ci-dessous, il faudra 17 min avant que le radiotélescope arrive sur la source. Le temps approximatif maximum est de 30 minutes.

Lorsque le pointage est effectué, l'antenne passe automatiquement en mode suivi, déplacement très lent permettant de compenser la rotation de la terre et ainsi de pointer parfaitement la source tout au long de l'observation (la position des astres par rapport à nous varie en fonction du temps).

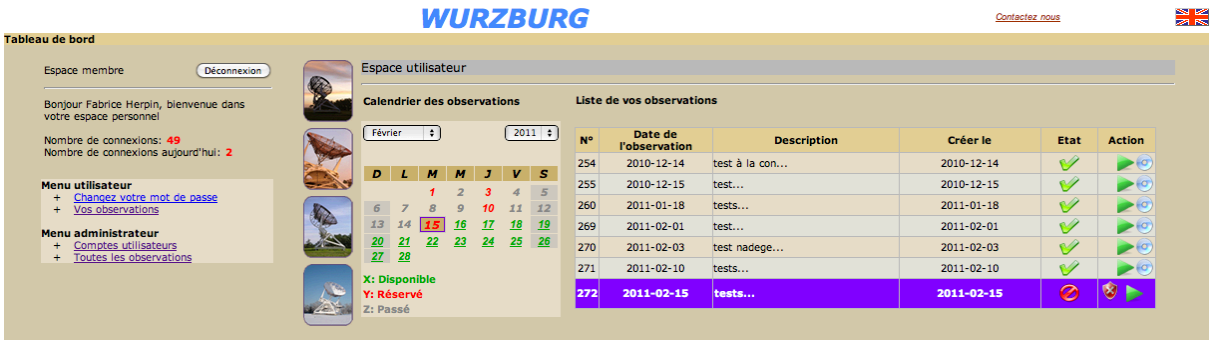
L'observation commence. Elle dure environ **30s** dans ce mode. L'image résultante de l'observation («*spectre*») est rafraîchie en temps réel.



Un message vous avertit que l'observation est terminée.



Vous pouvez récupérer votre observation en faisant une copie d'écran de l'image affiché. Vous pouvez récupérer les fichiers (plusieurs fichiers dont un fichier texte avec une colonne X pour la vitesse et une colonne Y pour l'intensité) de votre observation en clicquant sur le symbole représentant un CD sur la liste de vos observations comme montré ci-dessous :



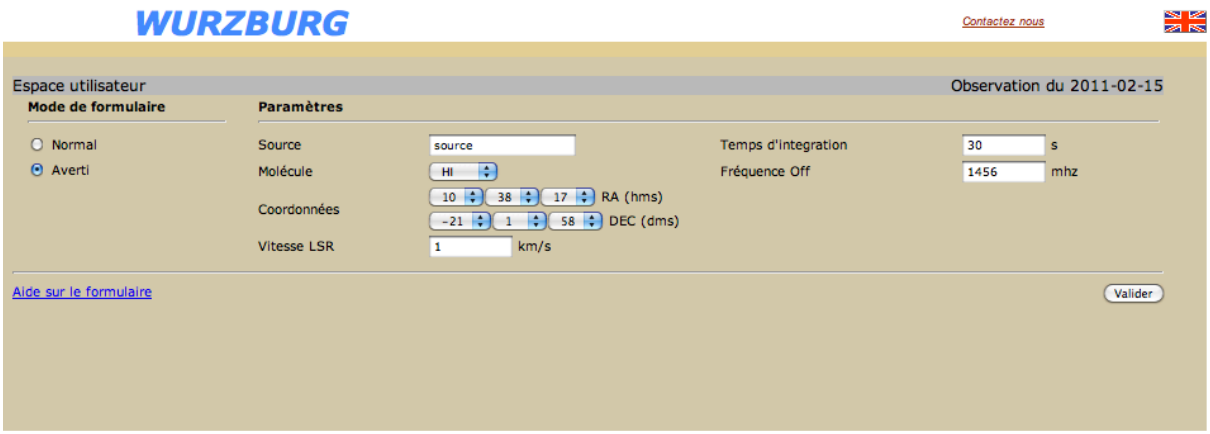
4. Observer en mode averti

Après avoir sélectionné ce mode, de nouveaux champs sont disponibles par rapport au mode normal.

Il n'y a plus de liste de sources proposées. Vous devez à présent **indiquer** vous-mêmes les **coordonnées** (*ascension droite* RA et *déclinaison* DEC pour l'instant) et **donner un nom** à votre objet.

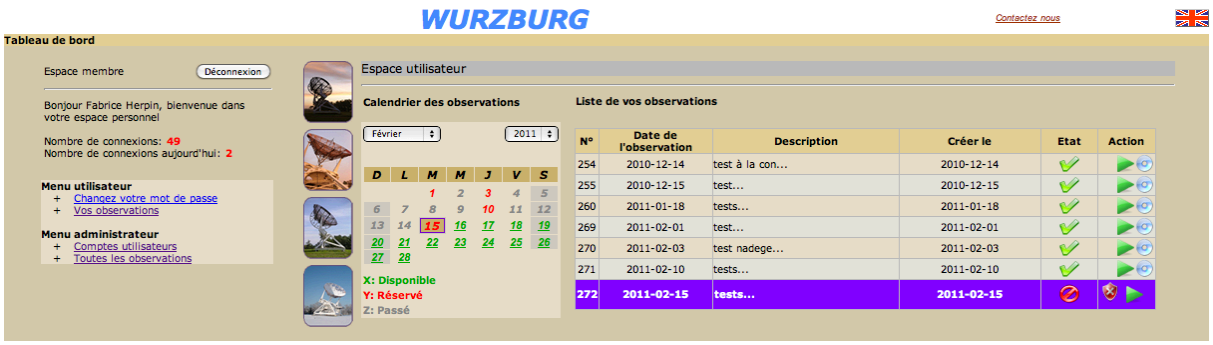
Vous devez aussi **spécifier la vitesse** de l'astre par rapport au référentiel LSR. Si vous ne la connaissez pas, 0 fera l'affaire, mais la raie risque de ne pas être au centre de la bande.
Vous devez ensuite **choisir un temps d'intégration**, c'est-à-dire la durée de votre observation. Par expérience, pour la plupart des sources HI quelques minutes suffisent.
Enfin, vous pouvez *en cas de besoin* changer la fréquence OFF de référence. Dans la grande majorité des cas, il est parfaitement inutile et donc déconseiller de changer cette fréquence OFF (normalement optimale). Mais si vous avez l'impression que votre référence est parasitée, vous pouvez essayer d'autres fréquences off (prioritairement entre 1450 et 1460 MHz).

Puis vous validez afin de lancer votre observation.



5. *Récupérer vos observations*

Vous pouvez récupérer votre observation en faisant une copie d'écran de l'image affiché. Vous pouvez récupérer les fichiers (plusieurs fichiers dont un fichier texte avec une colonne X pour la vitesse et une colonne Y pour l'intensité) de votre observation en clicquant sur le symbole représentant un CD sur la liste de vos observations comme montré ci-dessous :


WURZBURG
Contactez nous
Tableau de bord
Espace membre
Déconnexion
Bonjour Fabrice Herpin, bienvenue dans votre espace personnel
Nombre de connexions: 49
Nombre de connexions aujourd'hui: 2
Menu utilisateur
Changez votre mot de passe
Vos observations
Menu administrateur
Comptes utilisateurs
Toutes les observations
Espace utilisateur
Calendrier des observations
Février
2011
X: Disponible
Y: Réservé
Z: Passé
Liste de vos observations
N° | Date de l'observation | Description | Créer le | Etat | Action
254 | 2010-12-14 | test à la con... | 2010-12-14
255 | 2010-12-15 | test... | 2010-12-15
260 | 2011-01-18 | tests... | 2011-01-18
269 | 2011-02-01 | test... | 2011-02-01
270 | 2011-02-03 | test nadege... | 2011-02-03
271 | 2011-02-10 | tests... | 2011-02-10
272 | 2011-02-15 | tests... | 2011-02-15

VI. *CARTOGRAPHIER LA GALAXIE*

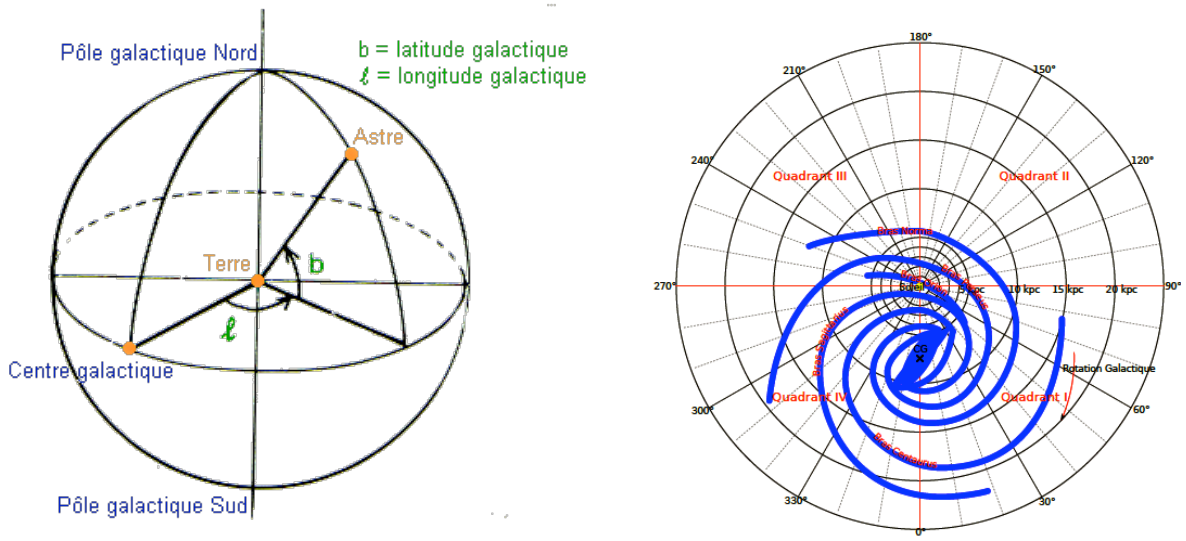


Figure 5 : Galaxie : Système de cordonnées galactiques (gauche). Carte de la Voie Lactée avec coordonnées (droite).

1. Les coordonnées galactiques

Le Soleil est situé à une distance d'environ 8,5 kpc du centre de la galaxie. La plupart des étoiles et des nuages de gaz sont placés dans un disque fin en rotation autour du centre galactique. Le Soleil a une vitesse radiale d'environ 220 km/s et exécute une révolution complète autour du centre de la galaxie en 240 millions d'années environ.
Pour décrire la position d'une étoile ou d'un nuage de gaz dans la galaxie, il est commode d'utiliser ce que l'on appelle le *système de coordonnées galactique (l, b)*, où l est la *longitude galactique* et b la *latitude galactique*. Le système de coordonnées galactiques est centré sur le Soleil. b = 0 correspond au plan galactique. La direction b = 90° est appelée "*pôle nord galactique*". La longitude l est mesurée en (h, min, s), en sens inverse des aiguilles d'une montre, à partir de la direction Soleil vers le centre de la galaxie. Le centre de la galaxie a ainsi pour coordonnée (l = 0 ; b = 0).
Par commodité, la galaxie a été divisée en 4 *quadrants*, en fonction de la longitude (voir Figure 5) :
- I : 0° < l < 90°
- II : 90° < l < 180°
- III : 180° < l < 270°
- IV : 270° < l < 360°

2. L'hydrogène de la Galaxie

La plupart du gaz dans la Galaxie est sous forme d'atome d'hydrogène qui émet une raie à 21 cm, soit 1420 MHz. La raie spectrale est produite quand le spin de l'électron se retourne et devient antiparallèle par rapport au spin du proton, amenant l'atome dans un état d'énergie plus faible. Bien que cet évènement soit très rare, la quantité énorme d'hydrogène dans la Voie Lactée rend la raie à 21 cm détectable. Lorsque nous voulons observer la raie de l'hydrogène, on règle le récepteur du radiotélescope sur une bande de fréquence proche de 1420 MHz. Cela

nous permet de trouver le gaz qui émet à la fréquence de 1420 MHz, malgré le fait que la fréquence augmente ou diminue quand il nous atteint, selon que le nuage de gaz que l'on observe s'approche ou s'éloigne de nous.

3. Géométrie de la Galaxie

Lorsque nous pointons notre radiotélescope vers un nuage de gaz de la Galaxie, nous ne voyons pas la vitesse réelle V. Ce que nous voyons est ce qu'on appelle la vitesse radiale V_r qui est la projection de la vitesse d'un nuage sur la ligne de visée (SM) moins la projection de la vitesse du soleil V0 sur la ligne de visée (cf. Figure 6).

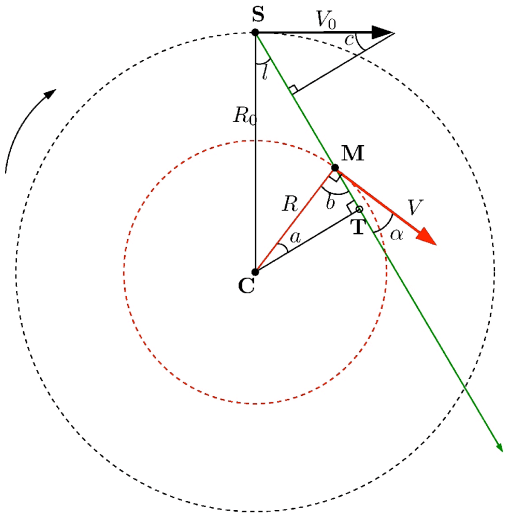


Figure 6 : Géométrie de la galaxie. «S» représente le Soleil (donc nous), «C» le centre galactique et «M» la source observée.

On définit :

V_0 = vitesse du Soleil autour du centre galactique (220 km/s)
R_0 = distance entre le Soleil et le centre galactique (8,5 kpc)
l = longitude galactique
V = vitesse réelle d'un nuage de gaz
R = distance entre le nuage et le centre galactique
r = distance entre le Soleil et le nuage

On peut donc écrire :

$$V_r = V \cdot \cos \alpha - V_0 \cdot \sin c \qquad (1)$$

De plus, on remarque sur la Figure 6 que :

$$(90 - l) + 90 + c = 180 \Rightarrow c = l \qquad (2)$$

La relation (1) devient donc :

$$V_r = V \cdot \cos \alpha - V_0 \cdot \sin l \qquad (3)$$

Par ailleurs, la droite CM fait un angle droit avec V. On peut donc écrire :

$$b = 90 - a = 90 - \alpha \Rightarrow a = \alpha \qquad (4)$$

Finalement, si on regarde la distance CT on s'aperçoit qu'elle peut s'écrire de deux façons :

$$CT = R_0 .\sin l = R .\cos \alpha \Rightarrow \cos \alpha = R_0/R . \sin l \quad (5)$$

Alors, V_r devient :

$$V_r = (V . R_0/R - V_0) . \sin l \quad (6)$$

Les seules inconnues de cette expression sont :
- R qui est la distance entre le nuage et le centre galactique,
- V qui est la vitesse réelle du nuage.

R est ce que nous voulons connaître afin de tracer la carte de la Galaxie et nous supposerons par la suite que V est constant en fonction de R.

4. La courbe de rotation

Lors de l'observation on peut avoir plusieurs nuages le long de la ligne de visée. Le nuage ayant la plus grande vitesse $V_{r,max}$ est situé au point tangentiel T où nous observons le vecteur vitesse le long de la ligne de visée. Dans ce cas nous avons :

$$R = R_0 .\sin l \quad (7)$$

$$V = V_{r,max} + V_0 . \sin l \quad (8)$$

En observant à des longitudes galactiques différentes, nous pouvons mesurer $V_{r,max}$ pour différentes valeurs de l. Nous pouvons alors calculer R et V pour chaque l et déterminer la courbe de rotation V(R).

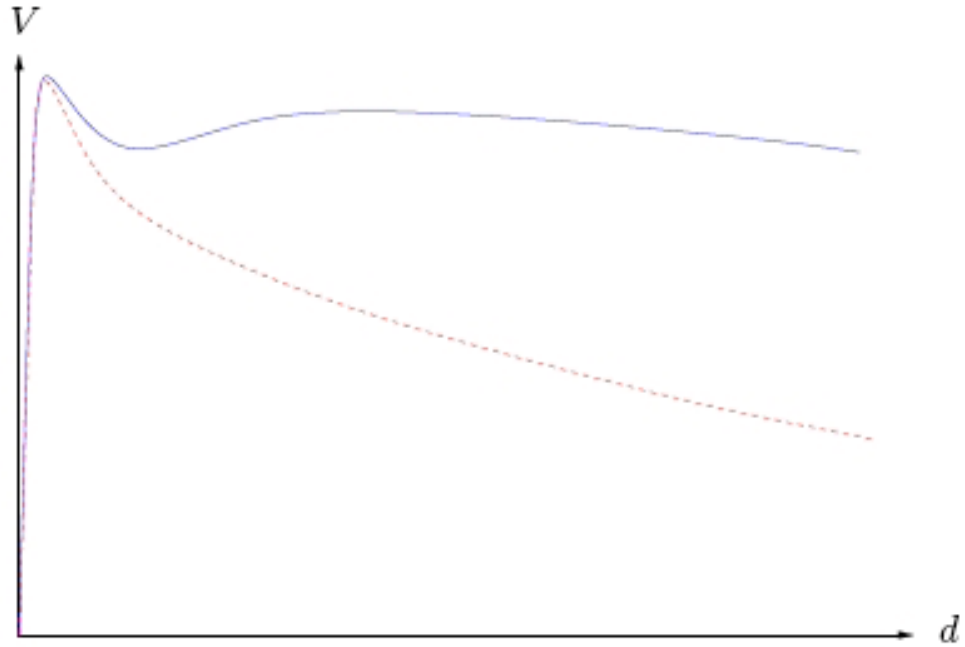


Figure 7 : courbe de rotation de la Galaxie

5. La distance du nuage au centre galactique R

Pour savoir où se situe le gaz que l'on détecte, il faut utiliser toutes les vitesses que l'on mesure sur le spectre et non seulement la vitesse maximale comme c'était le cas précédemment. Pour connaître R, on peut utiliser l'équation (6) mais en prenant $V(R)=V_0$. En effet, les courbes de rotation de la plupart des galaxies, et notamment de la Voie Lactée, ont des courbes de rotation plate (qui suggère d'ailleurs la présence de matière noire...).

L'équation (6) devient :

$$V_r = (R_0/R-1\ ) \,.\, V_0 \,.\, \sin l \qquad (9)$$

On peut donc en déduire R :

$$R = (V_0 \,.\, R_0 \,.\, \sin l) \,/(V_0 \,.\, \sin l + V_r) \qquad (10)$$

6. La position du nuage en coordonnées polaires (r,l)

Si nous voulons tracer la carte de la Galaxie pour y représenter les bras spiraux, le plus simple est de déterminer les coordonnées polaires (r,l) de chaque nuage détecté où r est la distance du nuage au Soleil et l la longitude galactique. D'après la géométrie de la Figure 6, on peut écrire l'équation suivante :

$$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2 \,.\, R_0 \,.\, r \,.\, \cos l \qquad (11)$$

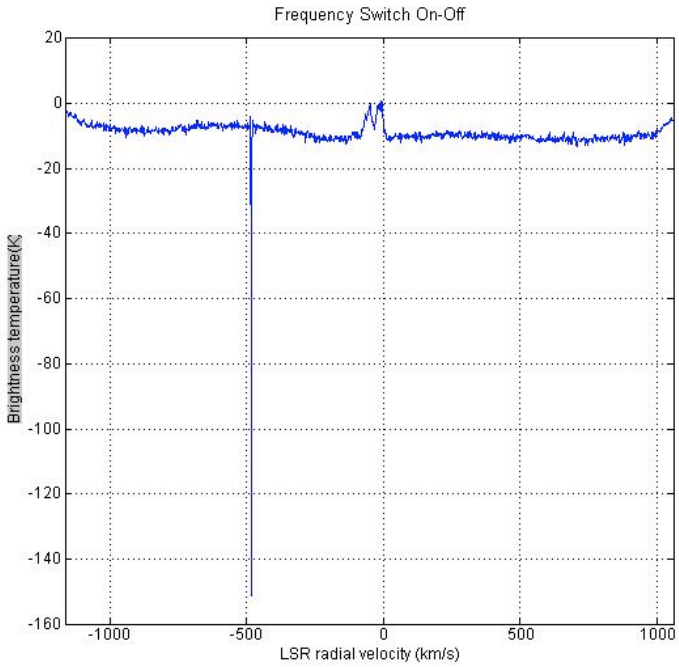
Ses solutions sont :

$$r\pm = \pm \sqrt{}\ (R^2 - R_0^2 \,.\, \sin^2 l) + R_0 \,.\, \cos l \qquad (12)$$

On remarque que dans les quadrants II et III, la position du nuage émetteur est déterminée de façon unique. Ainsi, il faudra exclure la solution négative r-. En revanche, dans les autres quadrants I et IV il y a deux positions possibles pour une valeur de l et de R données. On a la distance SM= r- et la distance SM''=R+ (avec M'' l'intersection entre ST et le cercle rouge).

VII. *ANALYSER LES OBSERVATIONS*

1. A partir de l'image



L'image («*spectre*») que vous avez récupéré représente le signal émis par l'espèce sélectionnée (ici le HI) et collecté par l'antenne. Comme expliqué précédemment, les atomes HI, par exemple, soumis à une source de chaleur externe (étoiles, collisions...) sont excités et émettent un rayonnement radio en revenant à leur état «normal».
L'axe des abscisses représente la *vitesse* par rapport à un référentiel (une référence) LSR. Si le signal capté apparait à par exemple -20 km/s, cela veut dire que la source que vous observez se déplace à cette même vitesse par rapport au référentiel.
L'axe des ordonnées représente la *puissance du signal* mesurée sous forme d'une température en Kelvins. En gros, plus le pic est d'amplitude élevée, plus les atomes HI sont nombreux et excités.
La forme globale de part et d'autre du signal HI (en dehors du double pic donc) est ce que nous appelons la *ligne de base*, un signal résultant du fond diffus d'émission venant du milieu dans lequel est la source, ainsi que du rayonnement de notre atmosphère et du radiotélescope (électronique par exemple) lui-même.

2. A partir du fichier Texte (X,Y)

Pour chaque observation que vous avez effectuée, et pour chaque seconde d'observation, a été généré un fichier de données «data_nomdesource_date_heure_x.class». Chacun de ces fichiers contient :

- une 1ère colonne avec l'intensité du signal (axe des Y sur la précédente image)
- une 2ème colonne avec les vitesses (axe des X sur la précédente image)

- une 3ème colonne avec les fréquences (équivalent de la 2ème colonne par effet Doppler)

Vous pouvez retracer le signal à partir de ces fichiers en utilisant n'importe quel logiciel graphique, voire Excel.

3. A partir des fichiers CLASS

Cette partie s'adresse à ceux qui voudrait pousser plus loin le traitement de l'observation à partir d'un logiciel professionnel appelé CLASS.
Le logiciel CLASS, qui fait partie d'un ensemble appelé GILDAS, peut être téléchargé à l'adresse suivante : http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS

Placez vous dans le répertoire où sont vos données. Par exemple, pour une observation de 60s (60 observations de 1s en fait) de la source «74_00», effectuée le 9 mars 2011 et débutée à 10H32mn31s, le contenu de vos répertoires est :

```
74_00_20110309_10h32mn31s.class         data_74_00_20110309_10h32mn31s_28.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_47.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_1.class  data_74_00_20110309_10h32mn31s_29.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_48.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_10.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_3.class  data_74_00_20110309_10h32mn31s_49.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_11.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_30.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_5.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_12.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_31.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_50.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_13.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_32.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_51.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_14.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_33.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_52.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_15.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_34.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_53.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_16.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_35.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_54.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_17.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_36.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_55.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_18.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_37.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_56.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_19.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_38.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_57.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_2.class  data_74_00_20110309_10h32mn31s_39.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_58.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_20.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_4.class  data_74_00_20110309_10h32mn31s_59.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_21.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_40.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_6.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_22.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_41.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_60.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_23.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_42.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_7.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_24.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_43.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_8.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_25.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_44.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_9.class
data_74_00_20110309_10h32mn31s_26.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_45.class new.30m
data_74_00_20110309_10h32mn31s_27.class data_74_00_20110309_10h32mn31s_46.class
```

Vous avez dans ce cas :

- 60 (i de 1 à60) fichiers «data_nomdesource_date_heure_i.class» représentant chacun une observation individuelle de 1s en format texte (X,Y),
- un fichier «nomdesource_dat_heure.class» qui est un petit programme informatique à utiliser sous CLASS pour convertir vos données en format CLASS,
- un fichier d'initialisation «new.class» appellé par le programme précédent.

Lancez ensuite le logiciel CLASS (sous Mac, il suffit de taper CLASS si le chemin du logiciel est connu) à partir du répertoire de données que vous voulez analyser.
Sous CLASS, vous allez lancer le programme «nomdesource_date_heure.class» présent dans votre répertoire de données en tapant la commande suivante :

```
LAS90> @74_00_20110309_10h32mn31s
```

c'est-à-dire @ suivi du nom de ce fichier.
Puis tapez entrée.

Quand la procédure est terminée, un nouveau fichier nommé «nomdesource_date_heure.wurz» vient d'être créé (ici «74_00_20110309_10h32mn31s60.wurz»), qui contient toutes vos observations dans le format natif de CLASS.

Nous allons maintenant lire ce nouveau fichier sous CLASS en tapant :
file in nomdesource_date_heure.wurz
Puis :
FIND

```
LAS90> file in 74_00_20110309_10h32mn31s60.wurz
I-CONVERT,  File is  [Native]
I-INPUT,  74_00_20110309_10h32mn31s60.wurz successfully opened
LAS90> find
I-FIND,          60 observations found
LAS90>
```

et enfin :
LIS
Apparait ensuite à l'écran la liste de vos observations :

```
LAS90> lis
Current index contains:
     1; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     2; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     3; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     4; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     5; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     6; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     7; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     8; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
     9; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    10; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    11; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    12; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    13; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    14; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    15; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    16; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    17; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    18; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    19; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    20; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    21; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    22; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    23; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    24; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    25; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    26; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    27; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    28; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    29; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    30; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    31; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    32; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    33; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    34; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    35; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    36; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    37; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    38; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    39; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    40; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    41; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    42; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    43; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    44; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    45; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    46; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    47; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    48; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    49; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    50; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    51; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    52; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    53; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    54; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    55; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    56; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    57; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    58; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    59; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
    60; 9 74_00       HI          WURZBURG        +0.0    +0.0 Eq   79.  1
LAS90>
```

Le chiffre à gauche est l'index de vos observations, «74_00» est le nom de la source, «HI» l'espèce étudiée, «WURBURG» évidemment le nom du télescope.
Nous allons maintenant accumuler, i.e. sommer ces observations (afin d'augmenter le rapport signal/bruit, c'est-à-dire diminuer le bruit de l'observation), en tapant la commande :
AVERAGE

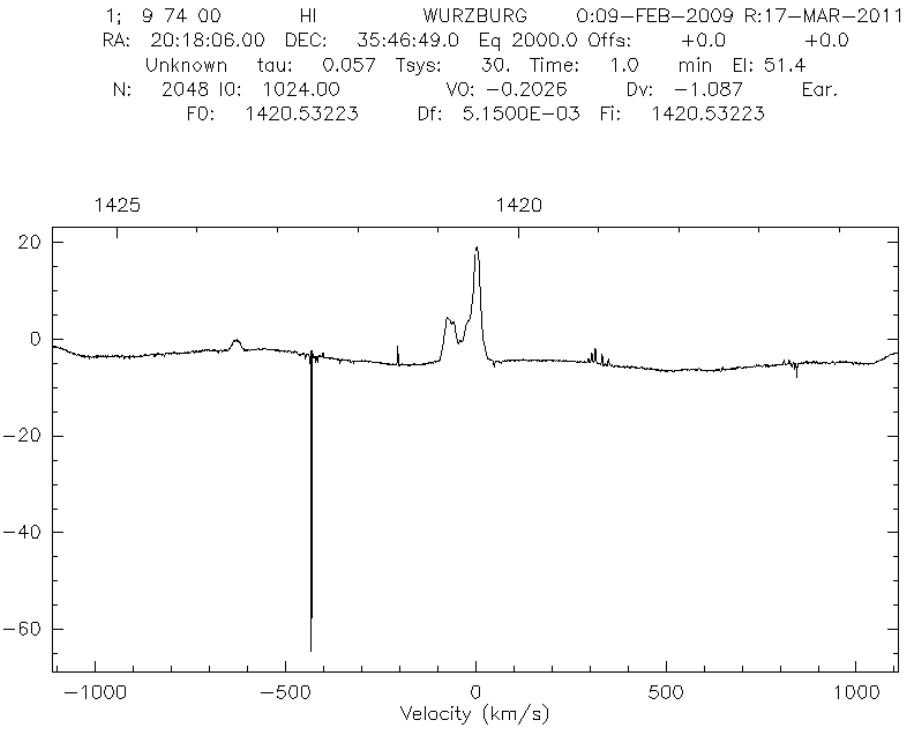
```
LAS90> average
```

Puis, pour voir le résultat :
PLOT

Le spectre cumulé apparait sur votre écran.
Vous pouvez afficher plus d'informations sur l'observation en tapant :
SET FORMAT LONG
puis :
PLOT

```
LAS90> pl
LAS90> set format long
LAS90> pl
LAS90>
```

Et vous obtenez :



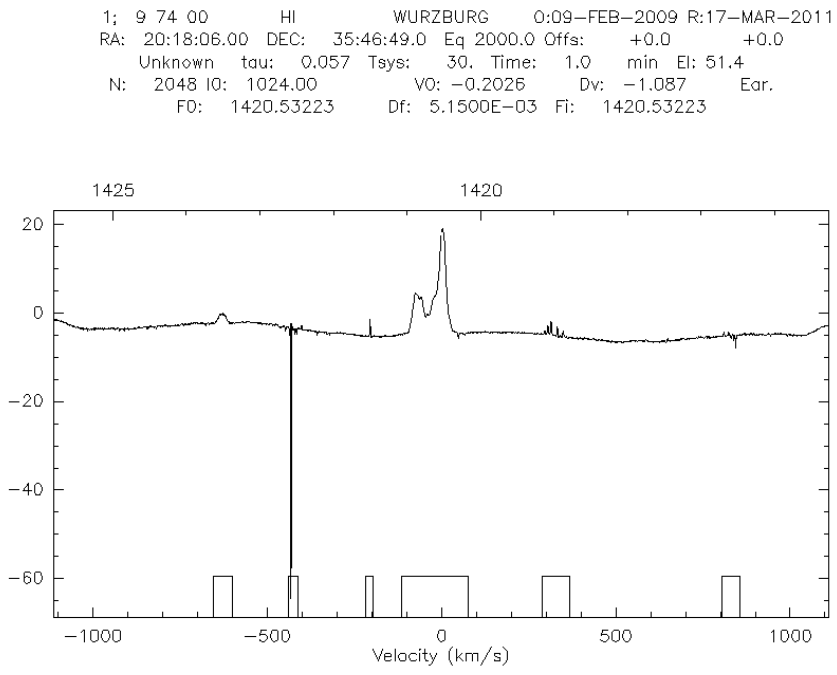
Vous retrouvez dans l'en-tête de cette figure, le nom de la source, de l'espèce étudiée, du télescope, la date d'observation, les coordonnées RA/DEC de cette source, le temps d'intégration cumulé en min (Time: 1min ici), la vitesse de la source que vous avez rentré (ici -0.2 km/s) etc.

Maintenant, nous allons nettoyer le signal en ôtant la ligne de base. Pour cela, nous définissons d'abord l'intervalle de vitesse où est le signal qui nous intéresse en tapant :
SET CURSOR ON
SET WIN
A ce moment là, le logiciel CLASS vous donne la main et vous pouvez déplacer un curseur, avec votre souris, par dessus l'image.
Appuyez sur la barre «espace» de part et d'autre de votre signal HI pour délimiter l'intervalle où est émis le signal.

Puis tapez «E» pour sortir du mode interactif.

Vous pouvez afficher la fenêtre que vous venez de définir en tapant :
DRAW WIN

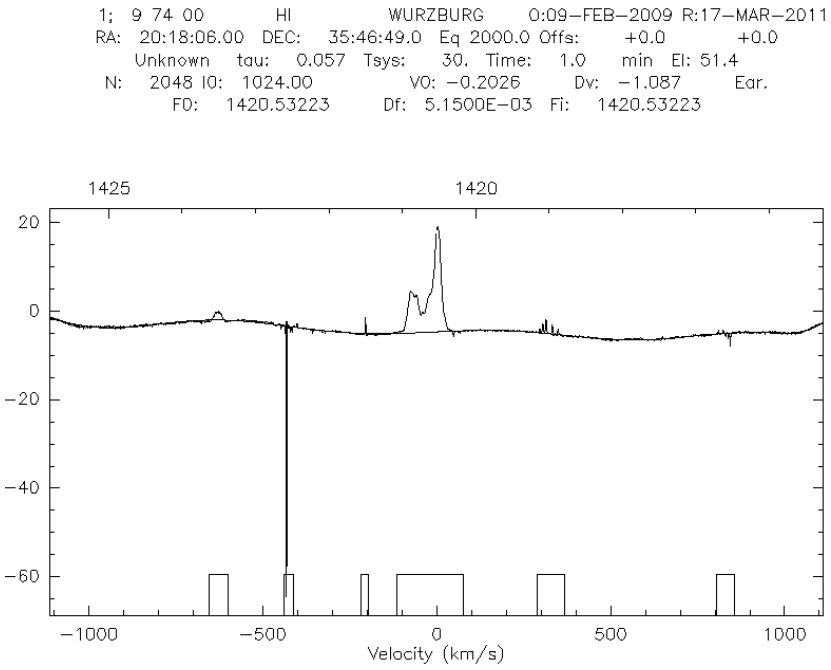
```
LAS90> set cursor on
LAS90> set win
LAS90> draw win
LAS90>
```



Ensuite, nous allons modéliser cette ligne de base (le signal étant maintenant exclu) par la commande :
BASE 9 /PL

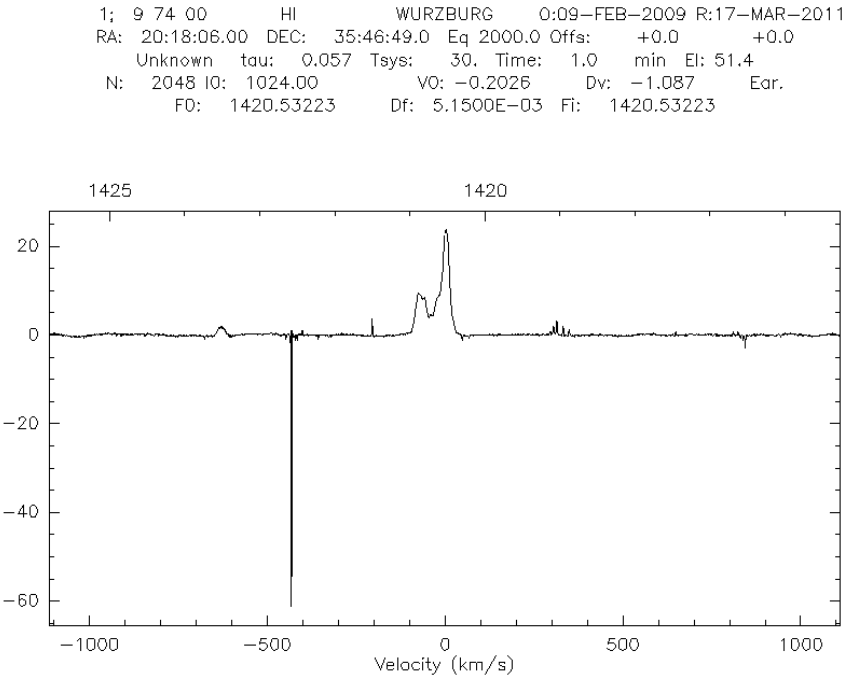
En gros, nous interpolons la ligne de base par un polynôme de degré 9 (à vous de jouer pour trouver le meilleur résultat, vous pouvez le faire autant de fois que vous voulez).

```
LAS90> base 9 /pl
I-POLYNO,  Degree  2 would be even better
I-POLYNO,  degree:   9 rms: 0.191     area:  995.     v0:  14.27     width: 0.000
LAS90>
```

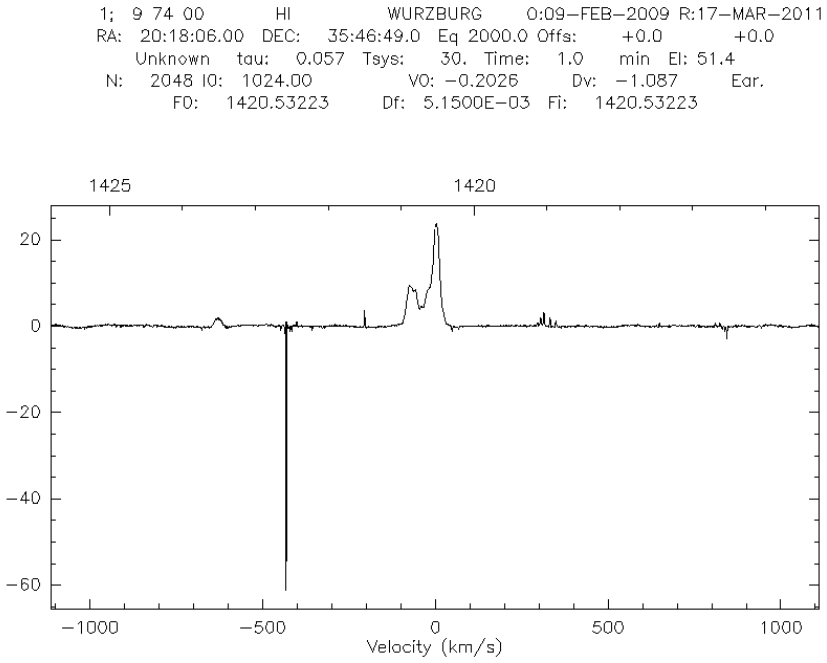


Tapez ensuite :
PLOT

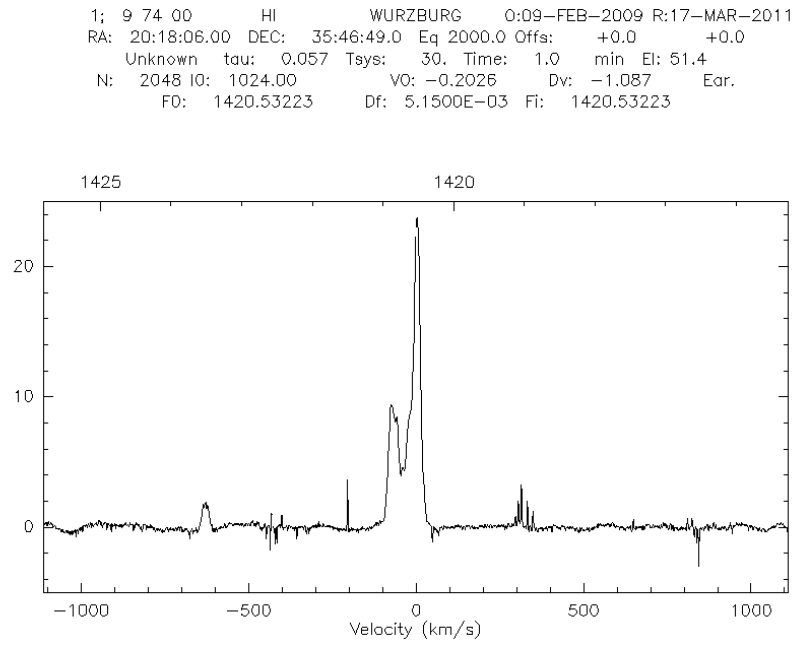
Et vous obtenez le spectre nettoyé, sans la ligne de base.



Vous pouvez également éliminer le trait «parasite» à gauche du signal HI en tapant :
DRAW
Vous avez la main maintenant et déplacez la souris exactement sur le trait, puis tapez :
KILL
autant de fois que nécessaire.



Puis «E» pour sortir du mode interactif. Enfin :
PLOT
pour afficher le résultat :



Pour sauver votre résultat, définissez un fichier de sortie (par exemple : image.wurz) :
FILE OUT IMAGE.WURZ m

Puis
WRITE

Votre travail est sauvé sur votre disque dans le fichier «image.wurz» que vous pouvez réouvrir à tout moment avec les commandes :
FILE IN IMAGE.WURZ
FIND
LIS
GET FIRST
PLOT

Vous pouvez également sauver votre résultat sous forme d'un fichier postcript :
HARD IMAGE.EPS /DEV EPS FAST

VIII. *Equipe Würzburg*

Le projet Würburg est le travail de toute une équipe, que ce soit au niveau management, technique ou informatique. En espérant n'oublier personne :

- *management* : F. Herpin, H. Soulié. Grandement aidés par P. Caïs et dans les affaires d'argent par A. Capéran.
- *mécanique* : J.C. Bouquier, F. Glize, M. Soulette, A. Triffaux, P. Truchelut
- *électronique* : P. Caïs, P. Camino, W. D'Anna, J.M. Desbats, S. Gauffre, B. Quertier, Z. Salim
- *informatique* : N. Autin, A. Caillo, W. D'Anna, B. Quertier, S. Rousseau, S. Lopez.

Nous tenons aussi à remercier David Denis-Petit (étudiant Bordeaux 1) pour son aide sur ce document (basé en partie sur son rapport de stage de Master) et pour tout le travail de caractérisation et de tests du radiotélescope qu'il a effectué. Egalement, nous tenons à remercier Ugo Hincelin pour la partie «Observations de la Galaxie», ainsi que Cathy Horellou et Daniel Johansson (Onsala Space Observatory) pour leurs conseils et leur travail avec l'antenne SALSA et le document «Mapping the Milky Way» qu'ils ont rédigé et dont nous nous sommes largement inspirés.

Nous remercions évidemment les directeurs du LAB (P. Charlot) et de l'OASU (F. Grousset) pour leur soutien, ainsi que les institutions qui nous ont aidé financièrement : LAB, OASU, Université Bordeaux 1, Ecole doctorale de Physique de Bordeaux 1, SF2A.